

уравнении зависимость  $\delta_2$  остается неопределенной от расстояния  $x$  (она находится в результате интегрирования). Поскольку связь  $C_f=f(\delta_2)$  приходится устанавливать экспериментальным путем, рассмотренный метод расчета течения на речном перекате является полумпирическим. Достаточно сложная процедура интегрирования с использованием различных предположений относительно поведения  $C_f$  и показателя степени  $n$  при течении на перекате будет рассмотрена в отдельной статье.

#### Выводы

Развитый подход, основывающийся на представлениях теории пограничного слоя, позволяет производить расчет неравномерного течения, в том числе с учетом изменения гидравлического сопротивления потока, развивающегося на речных перекатах, преимущественно для периодов летних меженьей.

Предлагаемый метод расчета позволяет решать многие практические задачи

речной мелиорации, судовождения и регулирования русла более точно и эффективно по сравнению с традиционными гидравлическими методами.

1. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сниценко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 270 с.

2. Шамов Г. И. Речные наносы. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 346 с.

3. Киселев П. Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.

Материал поступил в редакцию 26.09.12.

*Вольнов Михаил Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, зам. директора по научной работе*

*Тел. 8 (499) 153-21-33*

*E-mail: V1532133@yandex.ru*

УДК 502/504:556

#### А. В. РОМАНОВ

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России

#### В. В. ИЛЬНИЧ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И ПРОГНОЗОВ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Рассмотрены подходы к решению обратных задач относительно морфометрических и гидравлических характеристик русла в рамках одномерной модели неустойчившегося движения воды. Показана принципиальная возможность уточнения этих характеристик с помощью оперативной информации об уровнях и расходах воды на ограниченных по длине участках водотока.*

*Уровни и расходы воды, речные системы, характеристики русла, обратные задачи, интегральные уравнения.*

*There are considered approaches to the solution of reverse problems regarding morphometric and hydraulic riverbed characteristics in the frames of one-dimensional model of the unsteady water flow. There is shown a principal possibility of specifying the riverbed characteristics by means of the operative information on water levels and discharges within the limited watercourse length parts.*

*Water levels and discharges, river systems, characteristics of riverbed, inverse problems, integral equations.*

Основная идея данной работы состоит в обсуждении математических и технологических проблем, связанных с совершенствованием процедур восстановления двумерных функций (морфометрических и гидравлических), определяющих возможности построения численной схемы расчета (прогноза) уровней и расходов воды по длине участков отдельно взятой речной системы. Проблема рассматривается в рамках использования одномерной модели неустановившегося движения воды (система уравнений Сен-Венана) и стандартных данных наблюдений за водным режимом. Преобразуем систему дифференциальных уравнений, приведя ее к более простому виду при введении определенных допущений:

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{Q|Q|}{K^2} + \frac{1}{g} \frac{\partial \left( \frac{Q}{F} \right)}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{F^2} \right)}{\partial x} + q \frac{Q}{gF^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = q, \quad (2)$$

где  $H$  – уровень воды как функция координаты пути  $x$  и времени  $t$ ;  $Q$  – расход воды как функция координаты пути  $x$  и времени  $t$ ;  $q(x, t)$  – боковой приток (отток) воды на единицу длины;  $g$  – ускорение свободного падения;  $V(x, H)$  – функция ширины русла по урезу воды;  $K(x, H)$  – функция модуля расхода воды (пропускная способность русла);  $F(x, H)$  – функция площади поперечного сечения.

Практически все прямые методы определения характеристик русла, необходимых для интегрирования уравнений Сен-Венана, основаны на данных непосредственных измерений (топографических и гидрометрических) этих функций [1–4]. Как правило, для повышения точности расчетов неустановившегося движения морфометрические и гидравлические характеристики, полученные по измерениям, впоследствии корректируются каким-либо способом. Однако многочисленные исследования показали, что даже при использовании самых эффективных разностных схем и предельно учащенных фактических эхолотных измерений характеристик русла (приблизительно через каждые 100 м) с детальной их GPS-привязкой на местности и обработкой средствами ГИС-технологий, точность расчетов неустановившегося движения воды для реальных рек оказывается недостаточной. При этом следует иметь в виду

огромный уровень финансовых затрат на все перечисленные процедуры.

Впервые один из возможных, строго формализованных теоретических подходов к решению обратной задачи определения морфометрических и гидравлических характеристик русла, по данным наблюдений за приращением уровня воды над линией свободной поверхности потока, был намечен в работе [5]. Существенное развитие методов решения обратных задач для системы уравнений (1), (2) получено в работах [3, 6–8], доказавших целесообразность и экономическую эффективность такого подхода на гипотетических и реальных речных руслах. При постановке обратных задач относительно неизвестных функций  $F(x, H)$ ,  $V(x, H)$  и  $K(x, H)$  особое значение имеет объем заданной исходной информации о расходах и уровнях воды по длине расчетного участка. В условиях реально существующей на реках сети гидрометрических наблюдений можно рассмотреть два случая:

имеются наблюдения за расходами и уровнями в достаточно большом числе створов по длине реки;

уровни воды известны в достаточно большом количестве водомерных постов, а расходы только в начальном и конечном створах.

Первый случай можно реализовать только для тех участков рек, где ставились специальные наблюдения за неустановившимся режимом, например в нижних бьефах ГЭС. Такие наблюдения проводились для небольших участков рек, их число очень ограничено во всех странах мира. Безусловный практический интерес представляет решение обратных задач для второго случая, позволяющего существенно расширить возможности использования физически более строгих методов моделирования гидрологических процессов на большие и малые по площади водосборы с ограниченным объемом стандартных гидрометрических наблюдений.

Предположим, что имеются результаты наблюдений за уровнями воды в ряде пунктов по длине реки (достаточно хорошо освещающих продольный профиль) и за расходами воды в начале и конце расчетного участка. Интегрируя уравнение движения (1) по  $x$  от 0 до  $L$ , а уравнение

неразрывности (2) по  $x$  и  $t$  от  $x = 0$  до  $x = L$  и  $t$  от  $t = T_i$  до  $t = T_{i+1}$ , получаем:

$$H(0, t) - H(L, t) - \frac{1}{2g} [v^2(L, t) - v^2(0, t)] - \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^L v dx = \int_0^L \left[ \frac{Q^2}{K^2} + q \frac{Q}{gF^2} \right] dx; \quad (3)$$

$$\int_{T_i}^{T_{i+1}} [Q(0, t) - Q(L, t) - \Delta Q(t)] dt = \int_0^L [F(x, T_{i+1}) - F(x, T_i)] dx, \quad (4)$$

где  $\Delta Q(t) = \int_0^L q dx = (1-k)Q(0, t)$  – потери воды на расчетном участке;  $k$  – отношение объемов воды в замыкающем и входном створах;  $v$  – средняя скорость течения.

Таким образом, от дифференциальных уравнений в частных производных произошел переход к интегральным уравнениям Фредгольма первого рода относительно неизвестных функций  $K(x, H)$  и  $F(x, H)$ :

$$\int_a^b K(x, s) A(s) ds = U(s).$$

В работах [6–8] детально рассмотрены подходы к решению уравнений (3), (4) при допущении возможности представления искомым двумерных функций в виде разложения в ряд по системе ортогональных полиномов с использованием метода регуляризации и SVD-анализа. В них также рассмотрена возможность уточнения искомым двумерных функций с целью повышения точности расчета (прогноза) уровней и расходов воды с использованием системы уравнений (1), (2). Несмотря на то что в последнее время появились работы, в которых детально анализируются современные регуляризационные процедуры при решении некоторых обратных задач в области гидрологии, они не затрагивают задачу восстановления двумерных функций [9, 10]. Принципиальным отличием работы [6] от большинства работ в этой области является открытая публикация искомым функций, описывающих морфометрию и гидравлику русла. Эти материалы позволяют любому исследователю на примере реализованных речных систем (Нижняя Волга, Иртыш) отрабатывать любые по сложности численные схемы интегриро-

вания уравнений (1), (2) для повышения точности расчета и прогноза гидрографа стока. В настоящее время ведутся работы по дальнейшему развитию технологии решения обратных задач уравнений (1), (2) в рамках проекта Министерства образования и науки Российской Федерации: «Решение обратных задач на основе математических моделей формирования пространственно-временных характеристик русел рек для оперативных краткосрочных прогнозов паводков и половодья с использованием многоядерных суперЭВМ». Проект предполагает существенное расширение выполненных подходов с упором на прогностическую часть для речных систем Кубани, Нижней Волги и Иртыша. Все рассматриваемые речные объекты имеют свою специфику. При этом, пожалуй, наибольшую сложность с точки зрения задания исходной информации вызывает река Кубань, в первую очередь течение Верхней и Средней Кубани, где практически постоянно происходит наиболее существенное переформирование русла.

Прежде всего, это связано с недостаточной по времени точностью измерения расходов воды по длине основного русла и выделенных каналов. Кроме того, на Верхней и Средней Кубани скорости потока воды в период паводков могут достигать 3 м/с, что приводит к переформированию русла и поймы. Иногда это может происходить по несколько раз в год, что усложняет процедуры надежной фиксации отметок продольного профиля русла, качественного определения функций  $V(x, H)$ ,  $F(x, H)$ ,  $K(x, H)$  по данным реальных измерений и, как следствие, очень затрудняет построение кривых расходов  $Q = f(H)$ .

Одним из основных условий надежного обратного восстановления морфометрических и гидравлических характеристик русла является выполнение балансового соотношения сохранения объема воды между входным и замыкающим створами расчетного участка с учетом всех сосредоточенных притоков ( $k \rightarrow 1$ ) при формировании матрицы плана, реализующего решение интегрального уравнения (4). Невыполнение этого условия практически всегда говорит либо о

недостаточной точности гидрометрических измерений расхода воды по длине расчетного участка реки, либо о неучтенных потерях стока (таблица).

**Значения рассчитанных коэффициентов невязки стока  $k$  по длине реки Кубани за 1973–1976 годы для периода открытого русла**

Характеристика невязки стока	Номер расчетного участка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$k_i^j$	1973 год	1,0319	1,1997	1,3115	1,1089	0,9213	0,9637	1,0780	0,9571
	1974 год	0,9227	1,1125	1,2183	1,0986	0,8976	0,8740	1,2689	0,9954
	1975 год	1,0320	1,1458	1,0284	1,1107	0,9892	–	–	1,0572
	1976 год	1,0045	1,0166	1,1289	1,1076	1,0028	–	–	1,0623
$\bar{k}^j$	0,9978	1,1186	1,1718	1,1064	0,9527	0,9188	1,1734	1,0180	

Примечания:  $k_i^j$  – отношение суммарного объема стока на выходе к суммарному объему стока на входе для  $j$ -го расчетного участка по  $i$ -му году;  $\bar{k}^j$  – средняя величина коэффициента невязки стока для  $j$ -го расчетного участка; 1 – Коста Хетагурова – Усть-Джегута (32 км); 2 – Усть-Джегута (н.б.) – Дегтяревский (70 км); 3 – Дегтяревский – Успенское (84 км); 4 – Успенское – Армавир (45 км); 5 – Армавир – Темижбекская (82 км); 6 – Темижбекская – Кропоткин (54 км); 7 – Кропоткин – Ладожская (94 км); 8 – Армавир – Ладожская (230 км);  $\bar{k}^j$  – средняя величина коэффициента невязки стока для  $j$ -го расчетного участка.

Анализ таблицы показывает, что выбор расчетного участка для идентификации уравнений (1), (2) может быть неоднозначным и в конечном итоге определяется величиной  $\bar{k}^j$ , а также наличием данных измерений уровней воды  $H(x, t)$  на промежуточных водомерных постах. Учитывая появившиеся в последнее время новые методы проведения автоматизированных наблюдений за уровнями воды, можно уже сейчас говорить о принципиально другом подходе к организации таких постов по длине расчетных участков с целью оптимального освещения характера водного режима по всей длине расчетного участка. Таким образом, постановка и решение обратных задач для уравнений (1), (2) может в перспективе стать решающим фактором при организации сети наблюдений за водным режимом.

Еще одним значимым направлением, позволяющим существенно уточнить технологию решения обратных задач для уравнений (1), (2), является проведение круглогодичного мониторинга продольного профиля русла (линии отметок дна). Уточнение профиля в пунктах наблюдений за уровнем воды – необходимое и достаточное условие статистически более надежного определения искомых функций с использованием SVD-анализа, так как позволяет перейти от значений уровней воды к глубинам, что существенно упрощает процедуру регуляризации [6]. Опыт реализации разработанных алгоритмов показал, что даже в условиях слабо размываемого русла отметки линии дна могут существенно отличаться год от года.

Оптимальной процедурой в этом случае было бы использование подповерхностной радиолокации с искусственных спутников земли типа WorldView 2 (первый коммерческий аппарат с восьмиканальным мультиспектральным режимом съемки высокого разрешения), который, однако, позволяет определять отметки дна с точностью лишь до 0,5 м в условиях достаточно прозрачной водной поверхности.

**Выводы**

Реализация предложенных подходов к совершенствованию решения обратных задач для постоянного уточнения морфометрических и гидравлических характеристик русла позволит добиться повышения точности гидрологических расчетов и прогнозов (при несущественных финансовых затратах) по сравнению с неоднократными изменениями этих характеристик.

1. Грушевский М. С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.

2. Корень В. И. Математические модели в прогнозах речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 198 с.

3. Odraflood a hydrological model for the Odra watershed / Mengelkamp H. T. [and others] // Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. – 2004. – E-4 (377). – P. 55–64.

4. Unsteady flow in open channels / Edited by K. Mahmood, V. Yevjevich. – Fort Collins Colorado: Water Resources Publications, 1975. – V. 1. – 484 p.

5. Картвелишвили Н. А. Неустановив-



шиеся открытые потоки. – Л.: Гидромете-  
оиздат, 1968. – 284 с.

6. Романов А. В. Обратные задачи математического моделирования неустановившегося движения воды в реках. – М.: Научный мир, 2008. – 2008. – 184 с.

7. Романов А. В. Обратные задачи математического моделирования трансформации волн паводков и половодья // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 8. – С. 91–99.

8. Романов А. В. О технологии идентификации одномерной модели неустановившегося движения воды в сложном речном русле // Мелиорация и водное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 37–41.

9. Doherty J., Skahill B. E. An advanced regularization methodology for use in

watershed model calibration // Journal of Hydrology. – 2006. – V. 327. – P. 564–577.

10. Moore C., Wöhling T., Doherty J. Efficient regularization and uncertainty analysis using a global optimization methodology // Water Resources Research. – 10.1029/2009WR008627. – 2010.

Материал поступил в редакцию 12.03.12.

**Романов Алексей Викторович**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Тел. 8(499) 795-20-18

E-mail: alexey.romanov@tmcot.ru.

**Ильнич Виталий Витальевич**, кандидат технических наук, профессор

Тел. 8-903-269-51-74, 8(499) 976-17-45

E-mail: vv\_ilinitch@mail.ru.

УДК 502/504:556

**В. Н. МАРКИН**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕК ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ

*Экологическое состояние водных объектов во многом зависит от внешнего воздействия, величина которого не должна превышать допустимых пределов. В этом случае экосистема сохраняет свою устойчивость. Определение допустимых воздействий – задача, связанная с оценкой экологического состояния водного объекта при разных уровнях внешнего воздействия.*

*Рассмотрен вопрос оценки экологического состояния рек и их устойчивости к загрязняющему воздействию. Для этой цели использован метод соответствия параметров, который позволяет связать гидрохимические и гидробиологические параметры водного объекта с гидрологическими. Это дает возможность оценить изменение качества воды для лет разной водности и экологическое состояние водного объекта при разном уровне загрязнения.*

*Загрязнение, качество воды, водный объект, экологическое состояние.*

*The ecological condition of water objects depends on the external influence which size shouldn't exceed admissible limits. In this case an ecosystem keeps the stability. Definition of admissible influences is a difficult problem that is connected with an estimation of an ecological condition of water object being under different levels of external influence.*

*In the work the question of an ecological condition estimation of the rivers and their stability to polluting influence is considered. For this purpose the method of «Conformity of parameters», which allows to connect hydrochemical and hydrobiological parameters of water objects with the hydrological, is used. It gives an opportunity to estimate change of water quality in years of different flow, and an ecological condition of water object under different level of pollution. That defines novelty of the work.*

*Pollution, water quality, water object, ecological condition.*